

Title	電磁界解析を用いた車載電子機器の伝導性EMC設計技術に関する研究( Abstract_要旨 )
Author(s)	近藤, 陽介
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2018-03-26
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k21107">https://doi.org/10.14989/doctor.k21107</a>
Right	In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of Kyoto University's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to <a href="http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html">http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html</a> to learn how to obtain a License from RightsLink.
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	近藤 陽介
論文題目	電磁界解析を用いた車載電子機器の伝導性 EMC 設計技術に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>自動車の電動化や電子化に伴い半導体を搭載した車載機器の普及拡大が進むため、車載電子機器の電磁環境両立性（EMC: Electromagnetic Compatibility）の重要性が高まり、EMC を考慮した設計技術が強く求められている。本論文は、車載電子機器・部品の伝導性 EMC 性能を設計段階で予測することを目的として、伝導性 EMC 規格試験において使用される試験系について電磁界解析を活用してモデル化し、伝導性妨害波の伝搬量を定量的に求める解析技術と誤動作発生のシミュレーション技術についてまとめたものである。EMC は不要電磁妨害波（EMI: Electromagnetic Interference）の発生と、他の機器が発する妨害波の影響を受ける性質である電磁感受性（EMS: Electromagnetic Susceptibility）の両面が評価される。</p> <p>本研究では以下の 3 点について着目している。</p> <p>(1) 機器の動作や 3 次元構造を考慮した各部のモデル</p> <p>(2) システムグラウンドに対する配置および接地状況のモデルへの取り込み</p> <p>(3) 試験系を構成する各部のモデルの接続</p> <p>これら 3 点を実現可能な、電磁界解析を活用した解析手法を提案している。試験および設計対象である供試品（EUT: Equipment Under Test）、擬似電源回路網および外部負荷と、これらを相互に接続する金属製のワイヤーをモデル化し、個々のモデルを接続して系全体の解析を行う手法を提案している。</p> <p>第 1 章は序論であり、研究背景、先行研究および研究目的について述べている。</p> <p>第 2 章では、車載電子機器の伝導性 EMI/EMS 両方に共通する現象をまとめ、EMC 性能予測に必要な解析手法を示している。伝導性 EMC 試験系に関して解くべき問題を、IC やパワー半導体の端子間電圧と、試験系において観測される電気信号との信号伝達問題として定義している。設計対象である EUT 内部の複雑な配線系およびシステムグラウンドに対する配置・接地の影響を考慮するために、汎用的に解析可能な電磁界解析を用いることを提案している。系全体を電磁界解析にて解くことは計算規模が膨大になり実用上好ましくないため、ワイヤーを伝搬する妨害波が q-TEM モードになることに着目し、ワイヤー断面にてモデルを分割し q-TEM モードの入出力ポートに対応する S パラメータを求め、回路解析にて対応する q-TEM モードで接続する試験系のモデル分割手法の提案をしている。</p> <p>第 3 章では、EMI 評価のための伝導性エミッション試験系について、パワーエレクトロニクス機器（DC-DC コンバータ）を EUT とした電子機器のモデリング手法の提案および解析を行っている。解くべき問題を、妨害波発生源であるスイッチング動作しているパワー半導体の端子間電圧を求めることと、端子間電圧から妨害波観測点までの伝達関数を求めることの 2 つと定義し、周波数領域にて端子間電圧と伝達関数の積を計算することで、試験結果を予測する手法を提案している。伝達関数の算出には、システムグラウンドを含む EUT の電磁界解析モデルと、EUT 以外の外部試験系を測定により求めた S パラメータを用いて算出している。その結果、200 MHz 以下の周波数帯にて、妨害波のピークレベルを概ね 5dB 以下の精度で予測できること、設計検討可能な実用的な計算時間で解析できることを示すとともに、電磁界解析により電流密度等の物理</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	近藤 陽介
<p>量を可視化することができ、妨害波漏洩経路を視覚的に把握可能なことを示している。</p> <p>第 4 章では、EMS 評価のための伝導性イミュニティ試験である BCI (Bulk Current Injection) 試験系のモデル化手法を提案している。試験系を構成する注入プローブ、EUT、外部負荷、擬似電源回路網およびワイヤーを電磁界解析のモデル化の対象とし、それぞれシステムグラウンドを基準としたワイヤーへの信号伝搬特性（S パラメータ）が正しく表現できるよう、機器の接地や配置状況も含めて電磁界解析によりモデル化している。得られた各部のモデルを用いて、第 2 章で示した q-TEM モードに着目したモデル分割手法を適用することで BCI 試験系全体を表し、実用的な計算時間で解析可能な計算手法を提案している。システムグラウンドに対する接地方法が大きく異なる 2 種類の BCI 試験を解析し、その結果どちらのケースにおいても EUT に注入されるコモンモード電流を精度良く予測できることを確認している。また、EUT 外部の試験系として測定した S パラメータを使用した従来法では第 3 章と同様に 150 MHz 以上の周波数帯にて精度劣化していたが、提案手法では 400MHz まで精度良く解析可能である。</p> <p>第 5 章では第 4 章で構築した BCI 試験系のモデルを用いて、BCI 試験時における EUT 内部の IC チップ端子間に到達する妨害波を予測し、IC の誤動作発生有無を予測可能か検証している。3 端子のアナログ IC を対象として、線形インピーダンス回路網と IC チップ端子間妨害波電圧に対する IC の誤動作発生有無をモデル化した ICIM-CI モデルを作成し、シミュレーションより求まる IC チップ端子間電圧と BCI 試験時の IC 誤動作の関係を検討している。平衡度の異なる複数の外部負荷と、システムグラウンドに対する接地方法（コモンモード終端インピーダンス）の異なる複数の EUT を組み合わせた複数の BCI 試験に対してシミュレーションを行った結果、ICIM-CI モデルの誤動作発生妨害波電圧に不確かさが残るものの、解析で得られた IC 端子間妨害波電圧の周波数特性と、測定により観測される IC 誤動作の周波数特性とに良好な相関関係が得られている。また負荷の不平衡に起因するモード変換による誤動作発生や、EUT の接地によるコモンモード電流の増加および周波数特性変化に伴う誤動作特性の変化等、重要な特性を正しく再現できることを確認しており、注入プローブから IC 端子間までの伝搬特性を定量的に予測可能であることを示している。また、シミュレーションによる設計検討例として、接地線の違いによる IC 端子間電圧への影響や、ワイヤー長に起因する共振ピークを低減するための終端抵抗の検討例も提示している。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約しているとともに、今後取り組むべき課題と将来の展望について述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、車載電子機器・部品の伝導性 EMC 性能を測定する伝導性 EMC 規格試験系について、電磁界解析を活用してモデル化し伝導性妨害波の伝搬量を定量的に求める解析技術についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 車載電子機器内部の配線やフィルタ構造, 配線と筐体との電氣的な寄生結合およびシステムグラウンドに対する寄生結合を考慮するために電磁界解析を用いることを提案するとともに, ワイヤーに伝搬する妨害波が q-TEM (Transverse Electromagnetic) モードであることに着目したモデル分割を行うことで, 試験系全体を一括して解くことによるマルチスケール問題を回避し, 実用的な計算時間で試験系における妨害波伝搬を十分な精度で解析する手法を提案した。
2. パワーエレクトロニクス機器のスイッチングに伴う伝導性 EMI 問題に対し, 機器に対して電磁界解析手法を適用し, 実用的な計算時間で 200 MHz 以下の周波数においてピークレベルを概ね 5 dB の精度で解析できることを明らかにするとともに, 妨害波ピークに関係する機器内部の電氣的な共振経路を可視化できることなど, その実用性を示した。
3. 伝導性 EMS (Electromagnetic Susceptibility) 評価のための試験である BCI (Bulk Current Injection) 試験系を対象に, 車載電子機器, 外部負荷, 擬似電源回路網および注入プローブなどの試験系構成要素のモデル化手法を示すとともに, 提案手法を用いて系全体を解析し, 電子機器に注入されるコモンモード電流を精度良く算出できること, 実用的な計算時間で解析可能であることを示した。
4. IC 端子間妨害波電圧と IC の誤動作を関連付けるため, IC を線形インピーダンス回路網と端子間妨害波電圧にて誤動作発生有無のクライテリアを持つ ICIM-CI モデルを導入し, 平衡度の異なる外部負荷やコモンモード終端インピーダンスの異なる車載電子機器に対して BCI 法を用いたイミュニティ試験の解析を行った。その結果, 機器や外部負荷の変化に伴う IC 端子間電圧の周波数特性の変化を良好に再現できることを示し, 提案手法の有効性を示した。

以上, 本論文は、伝導性 EMC 試験系から IC やパワー半導体端子間までの妨害波伝搬を定量的に求める解析手法を新たに提案し, 車載電子機器・部品の性能として要求される高周波まで, 実用的な計算時間で伝導性 EMC 特性のシミュレーションを実現することで, 車載電子機器の EMC 設計を可能としているもので, 学術上, 實際上寄与するところが少なくない。よって, 本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また, 平成 30 年 2 月 19 日, 論文内容とそれに関連した事項について試問を行って, 申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し, 合格と認めた。